

organiques au niveau des sols sur les parcelles, les géomorphologues, hydrologues et sédimentologues qui évaluent les flux de carbone sur les versants vers les rivières et l'océan, et enfin les sciences humaines (géographes, économistes et sociologues) qui apprécient l'impact des sociétés sur l'environnement régional ou global.

Le contenu du colloque

Le colloque comporte deux symposiums scientifiques pour réunir le maximum de données sur l'érosion du carbone, le double bénéfique de la lutte antiérosive biologique pour réduire les risques environnementaux globaux (effets de l'érosion, des inondations et des gaz à effets de serre) et pour restaurer ou améliorer la fertilité des sols (stockage des MO, de l'azote, du phosphore et oligo-éléments, amélioration de l'agrégation, de l'infiltration et de la résistance à l'érosion).

Symposium 1 : Influence de l'érosion sur la séquestration du carbone : de la parcelle à l'océan.

Chap.1. Erosion du carbone au niveau de la parcelle.

Beaucoup de données ont été présentées sur l'importance des pertes de carbone par divers processus d'érosion sélectifs ou non à l'échelle de la parcelle en milieux tropicaux et méditerranéens. Par rapport à la production de biomasse (1 à 20 t/ha/an), les pertes en carbone particulaire (par érosion hydrique) sont modestes et ne représentent que 1 à 50 kg/ha/an en milieu bien protégé (forêts, prairies, cultures sous mulch ou plantes de couverture), mais 50 à 300 kg/ha/an sous cultures sarclées ou savanes brûlées et peut atteindre plus d'une tonne sur sol dénudé en milieu très agressif. Les pertes en carbone soluble dans les eaux de ruissellement ou de drainage au niveau des parcelles sont peu connues : elles augmentent de 1 à 600 kg/ha/an avec l'importance du volume drainé. Seule l'érosion en nappe est franchement sélective vis-à-vis du carbone. Par rapport aux dix premiers cm du sol, le coefficient de sélectivité du carbone varie de 0.5 à 14 et tend à décroître lorsque l'érosion augmente. On peut distinguer trois classes de CER : les sols nus (1.3 ± 0.2), les sols cultivés et les parcours dégradés (2.0 ± 0.5), et enfin les jachères herbeuses (2.7 ± 1.0), les savanes arbustives protégées (4.2 ± 3.2), et les forêts denses (7.5 ± 4.5). Les pertes en carbone particulaire sont surtout dépendantes du volume érodé et secondairement des teneurs en carbone de la surface du sol. Il semble que les changements d'usage des terres affectent plus l'érosion et le stock de carbone dans l'horizon de surface que l'érosion du carbone : en d'autres termes, si l'érosion diminue, les teneurs en carbone des sédiments augmente.

Les pertes de carbone par érosion et drainage sont du même ordre de grandeur que la capacité de séquestration de carbone du sol (0.1 à 3 t/ha/an). Par conséquent la lutte antiérosive biologique (paillage, plantes de couverture, etc), en couvrant mieux le sol, réduit les pertes par érosion et drainage et apporte plus de carbone à la surface du sol. On comprend mieux que l'effet " double gain " se traduise par une amélioration nette des MO des sols restaurés et une forte potentialité de séquestration du carbone. La conservation des sols et surtout la restauration des sols dégradés représentent donc un puits de carbone dont il serait utile de chiffrer les retombées économiques et environnementales.

Chap. 2. Variation des stocks et des flux de carbone sur les versants.

Les flux et les stocks de carbone des sols sur les versants varient en fonction des processus d'érosion, des formes de pente, de la rugosité de la surface du sol, de la densité de la couverture végétale au ras du sol. L'érosion aratoire (déplacement en masse par les outils de travail du sol) dépasse souvent l'érosion hydrique sur les surfaces convexes cultivées depuis des siècles avec des dépôts colluvionnaires très abondants en bas de pente concave ou sur les talus des limites de parcelles. Les labours répétés peuvent effacer des ravines sur les versants.

Le pâturage entraîne le tassement de la surface des sols, un ruissellement abondant et du ravinement actif entre les pâturages (généralement en haut de pente) et la source d'abreuvement. Enfin, les animaux prélèvent la biomasse sur de grandes surfaces de parcours et concentrent la fertilité sur les lieux de repos ou sur les champs voisins du parcage (champs de case plus riches en MO que les champs de brousse).

La fraction du carbone particulaire érodé (COP) diminue en fonction de son cheminement tout au long des rugosités des versants et les teneurs en COP baissent lors des forts charriages (le ravinement non sélectif décape plus bas dans le profil pédologique, plus pauvre en carbone).

Chap. 3. Les flux de carbone dans les fleuves.

Les formes de carbone présentes dans les systèmes fluviaux (ruisseaux, rivières, lacs, eaux souterraines, réservoirs, estuaires et deltas) combinent des produits en solution (DOC et DIC des auteurs anglo-saxons) et des produits particuliers (POC et PIC) tantôt organiques (DOC, POC, TOC) ou minéraux (bicarbonates et carbonates ou DIC, carbone inorganique particulaire ou PIC). Ces formes de carbone peuvent aussi être considérées selon leurs origines, et donc leur âge, depuis la biomasse algale âgée de quelques jours jusqu'à des centaines de millions d'années pour la dissolution et l'érosion mécanique des roches sédimentaires libérant DIC, PIC et même POC. Le carbone organique dissous (DOC) et la plus grande part du carbone particulaire ont pour origine le lessivage et l'érosion des horizons superficiels des sols intimement liés au cycle hydrologique (DOC) et à l'érosion mécanique (POC).

Dans les systèmes fluviaux, l'exportation fluviale de carbone organique totale (TOC) est en général très limitée par rapport à la production primaire terrestre, de l'ordre d'un pour cent : ce terme est donc secondaire dans les bilans de carbone, mais il correspond à un flux constant de l'ordre de $500 \cdot 10^{12}$ gC. an⁻¹. Le flux de carbone inorganique dissous et de l'ordre de dont une partie prépondérante provient du CO₂ atmosphérique utilisé dans les réactions d'altération des roches, l'autre partie provenant de la dissolution des minéraux carbonatés présents dans les roches superficielles : sur des roches non-carbonatées- basaltes, granites, boucliers précambriens- la totalité du DIC provient du CO₂ atmosphérique actuel, qui est ainsi transféré en continu de l'atmosphère aux océans et aux régions endoréiques où il se combine au calcium (Ca²⁺) pour former des roches carbonatées.

Ce transfert dans les systèmes fluviaux est régulé par de nombreux processus physico-chimiques et bio géochimiques, on peut alors parler de filtres en cascades : zones humides, lacs, réservoirs, plaine alluviale, estuaires et deltas. Les sols pouvant être considérés comme un premier filtre préexistant à tous les autres. Des études spécifiques réalisées à différentes échelles spatiales et temporelles permettent de mieux analyser la régulation de ces transferts de carbone. En milieu tropical humide de plaine comme sur le bassin expérimental de Nsimi (60 ha, Cameroun), la biomasse de forêt est énorme et régule des flux limites d'ions et de carbone générés par une altération chimique et une érosion mécanique minimales (9 mg/L de MES en moyenne) (Boeglin *et al.*, 2002). Les horizons de la séquence latéritique sont très profonds (10-30 m) et le carbone organique est essentiellement stocké dans les bas-fonds. Leur lessivage est permanent et l'exportation fluviale de matériaux est à dominance organique (le DOC représente 57% de la charge dissoute à

l'exutoire et 22% de la fraction particulaire), ce qui représente sans doute des proportions extrêmes à l'échelle globale. Suivant leur position dans ces petits bassins, les eaux sont « claires » (DOC= 1 mg/L) ou brunes (DOC= 15 mg/L), suivant une distinction faite depuis longtemps dans le bassin de l'Amazonie (Moreira-Turcq *et al.*,) à une échelle régionale (10^6 km²).

Dans d'autres bassins tropicaux situés sur des versants pentus, l'érosion mécanique des roches sédimentaires est 2 ordres de grandeurs supérieures à celle de Nsimi, comme au Laos et dans les Andes vénézuéliennes (Huon et Valentin, 2002). On peut alors distinguer d'autres sources de carbone, notamment du POC généré par l'érosion mécanique des schistes, en utilisant une nouvelle panoplie isotopique (¹³C et ¹⁴C, ¹⁸O), des composés carbonés organiques ou minéraux qui permet de quantifier la part de ce « carbone organique fossile » qui peut atteindre plusieurs dizaines de %.

Les activités humaines ont des impacts multiples sur les transferts et la rétention de carbone dans les systèmes aquatiques, conduisant à une accélération des sources et des transferts mais parfois aussi à des rétentions : le bilan net de l'anthropisation sur le cycle fluvial du carbone doit être approché au cas par cas. Le bassin de la Piracicaba dans l'état de Sao Paulo (12 400 km², 3 millions d'habitants fortement industrialisés) est un exemple d'influences multiples (Martinelli, 2002) : la forêt originale a été entièrement coupée en 50 ans et remplacée par une sylviculture, des pâturages et des cultures industrielles comme la canne à sucre. La partie supérieure du bassin amazonien, le Ji-Parana (Rondonia), a également subi une déforestation massive depuis 1980, alors que la partie inférieure n'est pas encore atteinte. La comparaison des deux bassins met en évidence ces multiples impacts liés aux changements d'usage du sol et aux apports organiques d'effluents urbains peu ou pas traités.

Les retenues collinaires, très présentes dans les pays les plus secs d'Afrique et d'Amérique, permettent d'assurer des réserves en eau sur des petits bassins (10^2 - 10^3 km²) mais affectent aussi les transferts de carbone. L'exemple de la Tunisie, développé par Albergel *et al.*, , montre que ces retenues sont également des pièges à sédiments très efficaces y compris pour le carbone organique particulaire (POC) étudié sur des carottes de sédiments. Les marqueurs géochimiques (Index d'hydrogène, composés hydrocarbonés libres etc.) montrent que le POC stocké (entre 0,4 et 1,6% des sédiments) provient en quasi-totalité des sols. Ce stockage sera fonction de la longévité de ces aménagements, en général de l'ordre de la centaine d'années au plus.

Dans les plus grands bassins fluviaux, d'autres filtres naturels peuvent être démontrés, c'est le cas du Delta Intérieur du Niger (Orange *et al.*, 2002), vaste zone humide (30 000 km²) d'épanchement des crues. Les cycles saisonniers du DOC et du POC sont complexes. Le POC, par exemple, présente un premier maximum à la montée des eaux (août) puis un deuxième en octobre lors des plus hautes eaux. Une partie importante de ce POC, à l'aval du Delta, est alors liée à la chlorophylle c'est-à-dire aux algues développées dans les mares et les plaines inondées. En fin de basses eaux, les débris de macrophytes produits dans les lacs du Delta sont remis en suspension. Malgré ce cycle complexe, les teneurs entrant et sortant du système Delta Central ne sont guère modifiées (DOC= 1,7 mg/L ; POC= 0,6 à 0,8 mg/L). L'utilisation de marqueurs isotopiques et/ou géochimiques permettrait de préciser ce cycle.

Les deux plus grands systèmes fluviaux du monde, Congo et Amazonie, ont été étudiés depuis quelques années notamment dans le cadre des programmes PEGI et PIRAT et du projet HiBAm. Sur le Congo (Orange *et al.*, 2002), les concentrations et les flux de carbone sont naturellement régulés par le cycle hydrologique propre de ce système, le plus régulé de la planète. Il est aussi caractérisé par des transports particuliers très limités (MES de 20 à 30 mg/L) en raison de l'absence de relief et de la protection assurée par la forêt tropicale humide. Comme sur l'Amazonie, on peut distinguer des affluents aux eaux brunes acides (« black waters, coca-cola Rivers ») très peu minéralisées et riches en DOC et des « eaux claires » plus minérales et à pH neutre. Par rapport aux eaux du Niger, les teneurs en carbone organique sont beaucoup plus élevées (DOC= 10 mg/L pour le Congo à Brazzaville et 5,7 mg/L pour l'Oubangui à Bangui) mais le POC reste modéré (1,7 et 1,3 mg/L). Les

flux spécifiques de carbone organique total (TOC) exportés par le Congo sont dix fois plus élevés que ceux exportés par le Niger.

Sur l'Amazone, Seyler *et al.*, 2002), les « eaux claires » sont attribuées au Tapajos, Xingu et Trombetas alors que le Negro est l'exemple type de « black waters ». Les flux transportés par les principaux tributaires de cet immense réseau (6,4 Mkm²) ont pu être mesurés avec précision sur un cycle hydrologique complet pour la première fois. Ce bilan met en évidence un excès de TOC transporté à Obidos de $4 \cdot 10^{12}$ gC.an⁻¹, par rapport à la somme des trois constituants principaux de l'Amazone (Negro, Solimoes, Madeira), que les auteurs attribuent à la production de matière organique dans la plaine inondable (« varzeas »). Le système amazonien à lui seul contribue pour 8 à 10% des apports de TOC fluvial aux océans.

Le comportement des formes du carbone, tant organique qu'inorganique, peut être étudié pendant un cycle hydrologique à une station donnée ou comparé d'une rivière à l'autre sur l'exemple des fleuves de la planète (Meybeck, 2002). Certaines propriétés sont quasiment universelles et peuvent être mises en évidence sur les variations intra-stations et inter-stations comme (i) la décroissance des teneurs en POC dans la matière particulaire lorsque celle-ci augmente, (ii) l'augmentation des exportations spécifiques de DOC et de POC avec l'écoulement fluvial, (iii) l'augmentation de la part du carbone fossile (DIC, PIC, POC, fossile) lorsque l'exportation de carbone total croit. L'augmentation des concentrations en DOC lors de la montée des eaux est très souvent observée, mais des exceptions sont parfois notées. Dans les fleuves soumis à l'eutrophisation anthropique, le carbone autochtone, d'origine algale, ou provenant de la calcite précipitée, peut dominer en été. L'impact du Changement Global sur les transferts fluviaux de carbone à l'échelle de la planète reste à faire car il combine des trajectoires opposées.

Le carbone fluvial qui aboutit aux océans est soumis à une régulation multiple (Ludwig). Les flux particuliers sont stockés à 90% ou plus sur la marge continentale. Le carbone organique (POC) est déjà affecté par le filtre estuarien puis est minéralisé lors de la diagenèse précoce des sédiments côtiers. Le DIC est graduellement précipité sous forme de sédiments carbonatés, assurant « la boucle du carbone fluvial ». Le DOC stocké dans les océans constitue un réservoir énorme comparable à celui des végétaux terrestres ou de l'atmosphère. Les biomarqueurs et le ¹³C lui attribuent surtout une origine marine. Le DOC fluvial est en fait souvent âgé, jusqu'à quelques milliers d'années d'après les premières datations effectuées au ¹⁴C. La boucle du carbone pourrait partiellement assimiler les différences de CO₂ émis entre les hémisphères Nord et Sud depuis 1950.

Le rôle du carbone fluvial, généré par l'érosion chimique et mécanique, à l'échelle globale au cours des temps géologiques a fait l'objet de nombreuses études depuis 20 ans (Probst) : le CO₂ atmosphérique « consommé » lors de l'altération des roches non-carbonatées serait un puit non-négligeable de CO₂ à l'échelle géologique. On est alors amené à examiner en détail l'altération des roches silicatées, soit sur des bassins homogènes (mono lithologiques), soit sur des grands systèmes fluviaux (Amazone, Congo, Brahmapoutra, Mackenzie). La reconstruction des flux de carbone passés comme aux épisodes de maximum glaciaire (18 000 BP) implique une connaissance fine du climat et de l'exposition des roches superficielles soumises à l'érosion. Avec le devenir du DOC à l'interface continents-océans, c'est une des questions qui demeure dans le cycle du carbone à cette échelle (Meybeck).

Symposium 2 :

Influence de l'usage des terres et de la lutte antiérosive sur l'érosion et la séquestration du carbone.

Une fois démontrée l'importance des flux de carbone au niveau des sols et des fleuves, il était important de mettre en lumière le double bénéfice de la lutte antiérosive biologique et de la restauration des sols dégradés sur la capacité des sols à fixer du carbone par la réduction des pertes par érosion, drainage et minéralisation.

Chap.4. L'importance des arbres.

S'il est clair que les forêts stockent du carbone dans le bois et dans le sol (>100 t/ha sur 30 cm de sol), il a été démontré (par ex. dans le Rif au Maroc) que le pâturage intensif dégrade la végétation et entraîne une perte de carbone du sol d'environ 40% et la culture de céréales cause un manque de 60% de carbone dans le stock des horizons de surface du sol. Heureusement la reforestation avec des espèces à croissance rapide (*Pinus halepensis* ou *Eucalyptus camaldulensis*) reconstitue 90% du stock initial en moins de 40 ans. Mais cette solution ne satisfait que rarement la population bénéficiaire. L'agroforesterie (oliviers ou fruitiers associés à diverses cultures) est intéressante pour la protection de l'environnement : elle reconstitue 80 % du stock de carbone (en 40 ans), améliore les revenus des ménages et permet de structurer l'exploitation des versants pentus en ménageant des zones d'impluvium et des aires de production intensive.

Le rôle des feux de brousse est complexe : il accélère la minéralisation de la biomasse, mais produit des particules de charbon de bois qui persistent bien plus longtemps que les acides humiques dans le sol. L'impact du feu sur le ruissellement et l'érosion est très temporaire : il favorise la régénération de certaines espèces qui couvrent et protègent rapidement le sol.

Chap. 5. L'impact de l'élevage

L'influence du (sur)-pâturage sur l'érosion et les MO du sol est encore mal connue. En effet, les animaux consomment 50 à 60% de la biomasse ingérée et ne restituent que 40% sous forme de déjections, mais la gestion de ces MO plus riches en nutriments permet de concentrer la fertilité et la fumure organique dans les zones de cultures intensives (seul mode de fumure des sols pendant bien longtemps). Il est apparu la nécessité d'études complémentaires sur l'influence des modes d'élevage sur les gaz à effet de serre (CO², mais surtout méthane et N₂O, bien plus dangereux) et les risques de ruissellement et de ravinement, en particulier le long des drailles, pistes qu'emprunte le bétail plusieurs fois par jour pour s'abreuver. Le rôle très positif de jachères courtes de légumineuse sur le stock de carbone du sol a été bien illustré par plusieurs chercheurs, mais son introduction en Afrique exige un changement profond des traditions de vaine pâture et de feux de brousse en saison sèche. De toute manière un apport de phosphore assimilable est indispensable pour valoriser les efforts de maîtrise des eaux et de lutte antiérosive.

La fumure organique et le compost améliorent la production mais ne laissent après la saison culturale que très peu de carbone séquestré dans le sol.

Chap. 6. Les techniques culturales.

Une abondante documentation a été réunie sur l'influence des techniques culturales. Les essais de semis direct sous litière en Amérique latine (Argentine, Brésil et Mexico) et en Afrique (Cameroun, Mali et Maroc) démontrent le double impact de ce système sur les risques d'érosion et sur la SEQC dans les sols (0.5 à 2t/ha/an). Bien que la durée des expérimentations soit encore trop limitée, on peut confirmer un bénéfice environnemental (moins d'érosion et plus de carbone stocké dans le sol) et un bénéfice économique (moins de travail et d'énergie). On manque encore de données en zone semi-aride. Pour que la réduction des pertes par érosion ne soit pas compensée par l'augmentation du drainage, il faut prévoir l'intensification de l'utilisation des ressources en eau : fertilisation raisonnée, forte densité de semis, agroforesterie, etc. Une attention particulière doit être portée sur le mode de gestion des résidus de culture, adventices et plantes de couverture qui sont bien plus efficaces contre le ruissellement et l'érosion si elles sont disposées en surface plutôt qu'enfouies : ces résidus absorbent complètement l'énergie des pluies et du ruissellement et se décomposent plus lentement. Dans la même perspective, l'épierrage peut " augmenter la surface apte aux semis " mais augmente les risques d'érosion (sol dénudé). On propose un compromis où les grosses pierres, les plus gênantes, sont collectées pour être rangées sur des cordons de pierres, mais les petites pierres sont remontées en surface par un hersage à dents larges pour former un mulch.

7. La lutte antiérosive biologique et la séquestration du carbone.

* Là où les grands chantiers de terrassement des terres ont souvent échoué, la lutte antiérosive biologique (haies vives, parcs arborés, bandes enherbées, jachères courtes de légumineuses en culture dérobée, gestion des résidus de cultures et des adventices en surface, travail limité du sol, etc.) a démontré son efficacité à réduire le ruissellement et surtout l'érosion en milieux suffisamment humides. Mais une gestion simultanée des états de surface du sol et de la fertilisation raisonnée est indispensable pour améliorer la productivité des terres et du travail.

* La gestion raisonnée de la biomasse et de la fertilisation complémentaire peut apporter des solutions satisfaisantes dans les agrosystèmes et relever le défi du XXIème siècle: nourrir une population qui n'a jamais été aussi importante et qui double tous les vingt ans, tout en réduisant les risques environnementaux. .

* Le carbone protégé dans les agrégats du sol a certainement une valeur économique et l'on pourrait imaginer que cette lutte antiérosive biologique trouve une partie de son financement chez les industries polluantes, émettrices de gaz à effet de serre.

« Land use, erosion and carbon sequestration »

an abstract of the Montpellier colloquium of september 2002

Eric ROOSE

Email : roose@mpl.ird.fr

version 1/2004

The problem

With the fast growth of the population during this century, the extension of cities and the intensification of cropping, soil degradation, flood frequency & erosion problems are extending to areas not yet degraded. Remember catastrophic floods last 3 years in Europe and Maghreb. Till now mechanical tools have been developed to drain excess runoff waters from the fields into channels to natural waterways with a minimum of ground losses. But the mechanical approach, very expensive, was not able to reduce soil degradation nor erosion between the SWC structures. They even may increase the rivers flow peak during the storms. The central objective of this colloquium is to demonstrate the effects of biomass management not only on erosion/runoff risks reduction but also their positive influence on the soil organic carbon (SOC) sequestration, soil erodibility, soil fertility and the reduction of the emission of greenhouse effect gaz having an impact on the global climate warming. How land husbandry may reduce carbon transfer by erosion, from the hillslopes to the river & ocean with acceleration of Carbon mineralisation or C sequestration in colluvium, alluvium and sea sedimentation.

Practical organization

The colloquium was organized by a team of researchers from the « French Erosion Network » and the laboratory MOST (Organic Matters of Tropical Soils) : a cooperation of IRD-ex-ORSTOM (Institut de Recherche pour le Développement) with CIRAD (Centre International de Recherche Agronomique pour le Développement) of Montpellier, France.

The scientific committee included personalities from french research institutes (IRD, CIRAD, CNRS, INRA), universities (Grenoble, Strasbourg, Paris, Lerida/Spain, OHIO /Usa, CENA from SAO PAULO / Brasil) Soil and Water Associations (Réseau Erosion, ESSC, WASWC). We thank founding organisations like IRD, CIRAD, CNRS of Toulouse, CTA of Wageningen, EU Cost 623 program, French Ministries of Environment, Culture and Foreign Affairs, The General council of Herault region for giving us the possibility to invite 24 participants from Africa & America.

From 23 to 28 September 2002, 123 researchers from five continents and various disciplines have presented 98 communications and posters in the Agropolis International Campus of Montpellier. The communications presented very rare datas from tropical , mediterranean and temperate regions : a book of 130 extended abstracts is available. Proceedings will be published in the « Bulletins du Réseau Erosion N° 22 & 23 and in various English Scientific Journals . A mid conference tour was organised in the Banyuls very old and famous vineyards at the piedmont of Pyrenees mountains to appreciate the evolution of traditionnal and modern management systems of runoff management on steep schist hillslopes susceptible to gully or mass movements and also to taste the quality of wines famous from the Phenician times (> 2000 years from now).

In the meeting various disciplines working at various scales from aggregates to fields, rivers & ocean have the rare opportunity to explain their data. Human sciences also have their word about the influence of the societies on the environment evolution and the planetary equilibrium .

The colloquium content

Two symposiums have succeeded to gather as much as possible datas on the win-win action of biological techniques to fight environmental risks (erosion, floods, gaz emission) and to restaure or improve the soil fertility (OC storage, nitrogen, phosphorus and oligo-elements regulation, aggregate stability, infiltration rate & erodibility improvement).

Symposium 1 : Influence of erosion on soil carbon sequestration : from the hillside to the ocean.

1. Erosion effect on carbon sequestration at the plot station

Many datas were presented on the importance of C losses by various erosion processus, selective or not, at the plot scale in tropical or mediterranean areas . Comparing with biomass production (1 to 20 t/ha/year), losses of particular organic C (POC) by erosion are limited, 1 to 50 kg/ha/year in stabilized environment (forest, prairie, mulch, cover crops, etc), but 50 to 600 kg/ha/year under annual weeded crops and more than 1 t/ha/year on bare plots under drastic conditions. Losses of dissolved organic carbon (DOC) by runoff and drainage waters are increasing from 1 to 600 kg.C/ha/year with the drainage volume from the Sahel to the moist evergreen forest.

Sheet erosion only is really selective for C :from 0.5 to 14 and tended to decrease with an increase in erosion. Three classes of CER have been distinguished : bare soils (CER = 1.3 ± 0.2), Crops and degraded rangelands (2.0 ± 0.5) and grass fallow (2.7 ± 1), woody savannah (4.2 ± 3.2) or dense forest (7.5 ± 4.5). As a first approximation, POC losses are depending on erosion volume and the C content of the ten first cm of soil. Losses of C by erosion and drainage are at a similar level to the potential of C sequestration into the soils (0.2 to 2.5 t/ha/year). Consequently, the biologische approach to stuggle erosion, covering better the soil reduce runoff & erosion and bring more C into the topsoil. This « double win effect » of land husbandry is larger when restoring clay soils. This C sink must be evaluated for getting founds from polluting industry.

2. Carbon fluxes & stocks variations on hillslopes,.

Carbon stocks vary in relation to erosion processes, slopes forms, soil roughness, vegetative cover density at the level of the soil.

Tillage erosion is often bigger than sheet erosion on cropped areas, with abundant colluvium at the bottom of the hillside and the embankments at the plots limits.

Grazing is compacting the topsoil, producing much runoff and digging gullies. Animals beat biomass on large grazing lands and concentrate fertility on the parking areas & on the fields near habitation (home fields are richer than fields far away). Particular C decreases when the distance of circulation increases on the hillsides and the POC ration decreases also during the flood peak because the runoff erodes deeply in the soil profile, poorer in carbon.

3. Carbon fluxes in the rivers.

Hydrologists & sedimentologists have shown with various markers the C fluxes importance in the rivers in relation to seasons, C eroded or drained, C dissolved by weathering of carbonate or silicate rocks (these are alone to fix carbon) and to development of phytoplankton. In marino-calcareous Tunisia, most of organic matter sequestered in sediments of two hill reservoirs are originated from vegetation and soils in the little watershed.

On a little reservoir of Venezuela, very steep on schists and sandstones, C losses by erosion are 1.6 kg/ha/year in average of 37 years. More the flood peak is high, and lower are the C content because the river beat in the rocks. In the Niger in Africa, the SOC is weak (1 to 2 mg/l/year but double the content of POC (0.6–0.8 mg/l/year). In great rivers, most of the SOC have their origine in drainage waters and from weathering rocks (carbonate or silicates).

Organic carbon coming from the soil humus are rapidly used for the river microfauna development in the river (eutrophication).

The biggest storage of Carbon in the world is in the ocean sediments (40 000 Gt of organic C) and the flux of continental C (1.2 GtC) is relatively modest. Other C sink (C in soils = 1500 GtC, and trees and vegetation (650 GtC) are degraded by mineralization by human activities like deforestation, cropping residues burning, deep tillage & grazing.

Symposium 2: Influence of biologic land husbandry on carbon sequestration and erosion

Once estimated the carbon fluxes on the soils & in the rivers, it is important to show the « win- win » of land husbandry, to sequester C in soils, to restore vegetation and soil fertility & to protect C against losses by runoff, erosion, drainage & mineralization.

4. The importance of trees

It is already known that forests can store a lot of C in the wood and in the soil (100 T/ha in 30 cm of topsoil). It was demonstrated in the Rif mountains of Morocco that intensive grazing destroys the vegetation and produce a loss of 26% of the soil C stock, but burning the matorral and cropping cereals produced a loss of 46 % of the C stock in the topsoil. Hopefully, reforestation with quick growing tree species (like *Pinus halepensis* or *Eucalyptus camaldulensis*) rebuild about 93% of the initial C stock in 40 years. But this radical solution does never satisfy the rural population losing the forest surface for grazing... Agroforestry (olive- and other fruit trees with cereals and leguminous rotation) is interesting for environmental protection: it rebuilt 71% of the primitive C stock, increases the net income of populations and allows to organize the hillslopes with « runnon agriculture » spots and areas of intensive production.

The influence of bush fires is complex. It accelerates biomass mineralization, but produces charcoal more resistant to mineralization than humus acids in the soil. The fire impact on runoff & erosion is very temporary: it improves the regeneration of certain species which cover and protect very fast the denuded topsoil.

5. Influence of grazing

The influence of overgrazing on erosion and SOC is still not well known. Indeed animals consummate 50 to 60% of biomass eaten but give back 40% as faeces. The

management of these residues richer in nutrients than plants allows to concentrate organic fertility in the intensive cropping areas : during centuries it was the only source of soil amendments. Complementary studies seemed necessary about the influences of the type of breeding and the leguminous cropping on greenhouse gaz (CO_2 but chiefly N_2O and methane , much more dangerous), runoff and gullies development along the path used by the animals for watering. The positive role of leguminous short fallows was well illustrated by numerous researches, but its introduction in Africa needs a deep change of habits concerning bush fires and grazing the crops residues. Any way assimilable phosphorus is needed to valorise the programs of soil and water conservation. Organic manure and compost increased the grain production but left very few SOC in the soil after the cropping season..

6. Cultural practices

Many studies concerned cultural practices. No-tillage under residue mulch in Latin America (Bresil, Argentina, Mexico, etc) and Africa (Cameroon, Mali & Morocco) give a good demonstration of the double positive impact of this strategy on erosion risks and on C sequestration in soils (0.5 to 2.5 tC/ha/an). Although the trial duration is still too limited, one can confirm environmental benefits (less erosion and more carbon stored in the soil) and economical benefits (less gasoline, labour and machinery, but more herbicides/pesticides). Data are missing in semi-arid areas. To avoid that decreasing erosion losses was compensate by increase in leaching, evapotranspiration must be increased by agro-forestry, intensification of cropping with reasonable fertilisation, high plant density, crop residues and weeds management on the topsoil, covercrops. These residues on the topsoil will dissipate the rainfall & runoff energy much better than if burried in and their mineralization will be reduced. In the same way, taking the stones off the field can increase the topsoil surface usefull for grain sewing, but at the same time the soil is denuded and more exposed to rain & runoff energy. An arrangement could be to collect big stones to put on stone bunds, but preserve the little pebbles on the soil surface to make a stone mulch, very efficient to limit erosion .

7. Influence of antierosive techniques on soil carbon sequestration .

Where large terracing site have failed, biologic approaches (living hedges, agro-forestry, leguminous short fallows, crop residues and weeds management on the soil surface, etc.) demontrated a hudge efficiency to reduce runoff & erosion in humid areas. But in the same time, the management of the topsoil surface and reasonnable fertilization is necessary to improve the soil productivity and the labour efficiency...

In conclusion,

The management of biomass, nutrients and physical soil properties (= land husbandry) may give acceptable solutions to meet the double challenge : nourish an increasing population and reducing the environmental risks.

The carbon sequestred in soil aggregates has certainly an economical value. We may imagine that the biologic soil & water management could be financed by those industries that produce greenhouse effect gaz.